

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБЖИГЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Аннотация

Разработана методика приближенного расчета теплообмена в слое железорудных окатышей, основанная на закономерностях передачи теплоты в неподвижном слое. Отмечено, что на продолжительность окислительного обжига железорудных окатышей на ленте конвейерной машины влияют условия теплообмена, распределение температур газа и материала по высоте слоя, большое влияние оказывают физико-химические процессы, протекающие в слое окатышей при его нагреве (окисление магнетита, разложение карбонатов и другие). Большая часть из них протекает с выделением или поглощением теплоты. В результате расчет теплообмена в обжигаемом слое окатышей представляет собой сложную задачу. Показано, что получить решение системы уравнений, описывающих теплообмен в слое окатышей, в общем случае, не представляется возможным, а можно лишь приближенно с использованием ступенчатой аппроксимации краевых условий и параметров задачи, либо численным методом с помощью ЭВМ, который и рассмотрен в работе. С помощью составленной программы проведен расчет теплообмена в слое окатышей применительно к режиму обжига их на конвейерной машине.

Рассмотренная методика имеет большое практическое применение, так как позволяет определять оптимальную продолжительность процесса обжига окатышей с учетом влияния на теплообмен различных факторов, а следовательно, заданную степень завершенности всех физико-химических превращений в обрабатываемом слое с получением качественного продукта.

Ключевые слова: теплообмен, метод расчета, железорудные окатыши, физико-химические процессы, слой, конвейерная машина, обжиг, температура, решение, аппроксимация, параметры, задача, численные методы, продолжительность, краевые условия.

Abstract

A method for approximate calculation of heat exchange in a layer of iron ore pellets is developed, based on the patterns of heat transfer in a fixed bed. It was noted that the duration of oxidizing roasting of iron ore pellets on the belt of the conveyor machine is affected by the conditions of heat exchange, the distribution of gas and material temperatures over the height of the layer, and the physical and chemical processes that occur in the layer of pellets upon heating (oxidation of magnetite, decomposition of carbonates and others). Most of them flow with the release or absorption of heat. As a result, the calculation of heat transfer in the fired layer of pellets is a complex task. It is shown that it is not possible to obtain a solution of the system of equations describing the heat transfer in the layer of okay in the general case, but only approximately using stepwise approximation of the boundary conditions and parameters of the problem, or by a numerical method with the help of a computer, which is considered in the work. With the help of the compiled program, the calculation of heat exchange in the layer of pellets was carried out with respect to the mode of roasting them on a conveyor machine.

The considered technique has a great practical application, since it allows to determine the optimal duration of the pellet roasting process, taking into account the influence of various factors on the heat exchange, and, consequently, the specified degree of completeness of all physical and chemical transformations in the treated layer with obtaining a quality product.

Key words: *heat exchange, calculation method, iron ore pellets, physicochemical processes, layer, conveyor machine, firing, temperature, solution, approximation, parameters, task, numerical methods, duration, boundary conditions.*

Введение. Расчет окислительного нагрева железорудных окатышей основан на закономерностях передачи теплоты в неподвижном слое, являющемся частным случаем теплообмена в перекрестном токе. Время нагрева слоя, а следовательно, и производительность обжиговой машины конвейерного типа зависит от многих факторов: теплофизических свойств [1-5] и размеров окатышей; физико-химических процессов, протекающих в слое при нагреве окатышей; расхода и температуры теплоносителя. Поэтому поиск оптимального режима обжига окатышей представляет собой сложную задачу. Решение задачи в общем виде еще сложнее, так как изменение условий теплообмена влечет за собой изменение условий спекания, т.е. качества обожженных окатышей. Поэтому возрастает роль предварительных расчетов тепловых режимов обжига слоя окатышей.

Расчеты нагрева слоя усложняются зависимостью теплофизических свойств окатышей и теплоносителя от температуры, наличием в слое внутренних источников теплоты, связанных с протеканием химических реакций. При этом аналитические решения по теплообмену в слое имеют те или иные ограничения, сужающие область их применения [6, 7].

Методика приближенного расчета теплообмена в слое окатышей. При использовании аналитических методов целесообразно расчетом определять положение изотермы по высоте слоя, т.е. определять зависимость температуры от высоты слоя и времени. Это позволяет учесть переменность теплофизических свойств окатышей, выбираемых по конкретной температуре изотермы. С целью определения температурного поля в слое целесообразно расчет производить по 5 – 7 изотерм. Помимо аналитических методов расчета нагрева слоя получают распространение и численные методы с использованием ЭВМ.

На практике используют приближенные методы расчета теплообмена в слое с учетом линейно-ступенчатой аппроксимации граничных условий, когда кривая распределения начальной температуры слоя $t_m(h, 0) = F_m(h)$ аппроксимируется ступенчато, а кривая распределения газа по времени $t_g(0, \tau) = F_g(\tau)$ аппроксимируется линейно. Последний метод нашел широкое применение. В настоящее время более перспективно использование для таких расчетов универсальных пригодных для разных условий задачи программ для ЭВМ. Этот метод расчета рассматривается ниже.

Уравнения, описывающие теплообмен в неподвижном слое, записывают в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_g}{\partial h} &= -\frac{k_v}{c_g w_g} (t_g - t_m); \\ \frac{\partial t_m}{\partial \tau} &= \frac{k_v}{\rho_m c_m} (t_g - t_m), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где t_g – температура газа, °С; t_m – температура материала, °С; k_v – объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³°С); h – высота слоя, м; c_g – теплоемкость газа,

Дж/(м³°С); w_r – скорость фильтрации газа на входе в слой, м/с; τ – время, с; ρ_n – насыпная плотность материала, кг/м³; c_m – теплоемкость материала, Дж/(кг°С).

Коэффициент теплопередачи k_v определяют из выражения

$$k_v = \frac{6C\lambda_z(1-m)}{d^2[\text{Re}^{-n} + 0,1C\lambda_z/\lambda_m]}, \quad (2)$$

где $d=2R$ – диаметр окатыша, м; C и n – коэффициенты из выражения вида $Nu = C \text{Re}^n$ (Nu и Re – числа Нуссельта и Рейнольдса), λ_r – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м°С); λ_m – коэффициент теплопроводности окатыша, Вт/(м°С).

Если принять, что характеристики окатышей и газа не зависят от температуры, то система (1) решается аналитически. В реальных условиях процесса теплообмена в слое теплотехнические характеристики газа и материала, как и величина k_v , существенно зависят от температуры. Поэтому система (1) оказывается нелинейной:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_z}{\partial h} &= -K_1(t_z, t_m)(t_z - t_m); \\ \frac{\partial t_m}{\partial \tau} &= K_2(t_z, t_m)(t_z - t_m), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $K_1 = k_v / (c_z w_z)$, $K_2 = k_v / (\rho_n c_m)$.

Система (3) аналитически не может быть решена за исключением случаев, когда зависимости $K_1(t_r, t_m)$ и $K_2(t_r, t_m)$ достаточно просты. Поэтому практическим способом решения системы (3) является численный метод, в частности метод сеток.

Разобьем слой по высоте на несколько слоев, высотой Δh и будем рассматривать изменение температуры в течение интервалов времени $\Delta \tau$. Соединяя точки $h = \sum \Delta h_i$ и $\tau = \sum \Delta \tau_k$, получили сетку (рис. 1, а). Принципиально можно вести расчет двумя способами: по узлам сетки, по междуузлиям сетки. От принятого способа зависят объем и точность вычислений.

На рис. 1, б изображена отдельная ячейка сетки. Записывая систему (3) в конечных разностях (рис. 1, б) и принимая для сокращения числа индексов $t_z = \vartheta_z$, $t_m = t$, получим систему уравнений для нахождения температур $t_{i,k}$ и $\vartheta_{i,k}$:

$$\left. \begin{aligned} t_{i,k} &= \frac{(b_1 + q)\Delta Z + b_2(2 + \Delta Y)}{2 + \Delta Z + \Delta Y}; \\ \vartheta_{i,k} &= \frac{(b_2 - q)\Delta Y + b_1(2 + \Delta Z)}{2 + \Delta Z + \Delta Y}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $q = \vartheta_{i-1,k-1} + \vartheta_{i-1,k} + \vartheta_{i,k-1} - t_{i-1,k-1} - t_{i,k-1} - t_{i-1,k}$; $b_1 = \vartheta_{i-1,k-1} + \vartheta_{i-1,k} - \vartheta_{i,k-1}$; $b_2 = t_{i-1,k-1} + t_{i,k-1} - t_{i-1,k}$; $\Delta Y = k_1(\bar{\vartheta}_{i,k}, \bar{t}_{i,k})\Delta h$; $\Delta Z = k_2(\bar{\vartheta}_{i,k}, \bar{t}_{i,k})\Delta \tau$.

Формулы (4) позволяют по трем точкам ячейки сетки найти температуры в четвертой точке i, k .

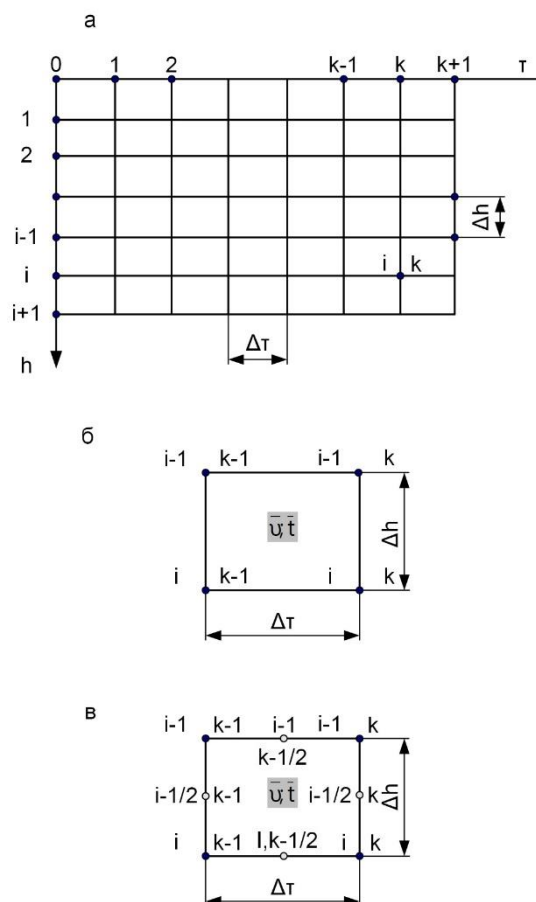


Рис. 1. Пояснения к расчету по методу сеток

На рис. 1, б изображена ячейка сетки для метода расчета по междуузлиям сетки. В соответствии со схемой ячейки запишем систему уравнений (3) в конечных разностях. Будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} t_{i-\frac{1}{2},k} &= \frac{2\Delta Z \vartheta_{i-1,k-\frac{1}{2}} + t_{i-\frac{1}{2},k-1}(2 - \Delta Z - \Delta Y)}{2 + \Delta Z + \Delta Y}, \\ \vartheta_{i,k-\frac{1}{2}} &= \frac{2\Delta Y t_{i-\frac{1}{2},k-1} + \vartheta_{i-1,k-\frac{1}{2}}(2 - \Delta Y + \Delta Z)}{2 + \Delta Z + \Delta Y}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вычисления по формулам (4) будут более точными. Однако формулы (5) легче программируются, особенно с точки зрения учета начальных и граничных условий. Ниже при расчетах теплообмена в слое на ЭВМ используются формулы (5), как более простые для программирования.

Составлена программа расчета теплообмена в слое окатышей применительно к режиму обжига на конвейерной машине. Расчет охватывается зона подогрева окатышей, разбитая на две подзоны, зона обжига и зона рекуперации.

Рассмотрим конкретные примеры расчета теплообмена в слое окатышей. Программа предусматривает возможность варьирования многих параметров задачи, в частности c_m , c_r , w_r , λ_m , λ_r и т.д., в широком диапазоне температур от 0 до

1400°С. Начальная температура окатышей задана таблично, температура газа на входе в слой – линейными функциями в каждой зоне расчета (I – зона подогрева, II, III – зона обжига, IV – зона рекуперации).

Величину коэффициента теплоотдачи α_F определяли по известным формулам [8]:

$$\left. \begin{aligned} Nu &= 0,106 Re, Re < 200; \\ Nu &= 0,61 Re^{0,67}, Re > 200, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и по формуле автора [9], полученной в результате экспериментов на аглочаше и имеющей вид:

$$Nu = 0,000282 Re^{1,5}. \quad (7)$$

Результаты расчета приведены на рис. 2. Там же приведены данные эксперимента. Видно, что расчет по формуле (6) значительно занижает время нагрева, а по формуле (7) – не менее значительно завышает. Очевидно, применительно к нашим условиям эксперимента, величина α_F должна занимать некоторое промежуточное значение по сравнению с использованными в расчете крайними вариантами.

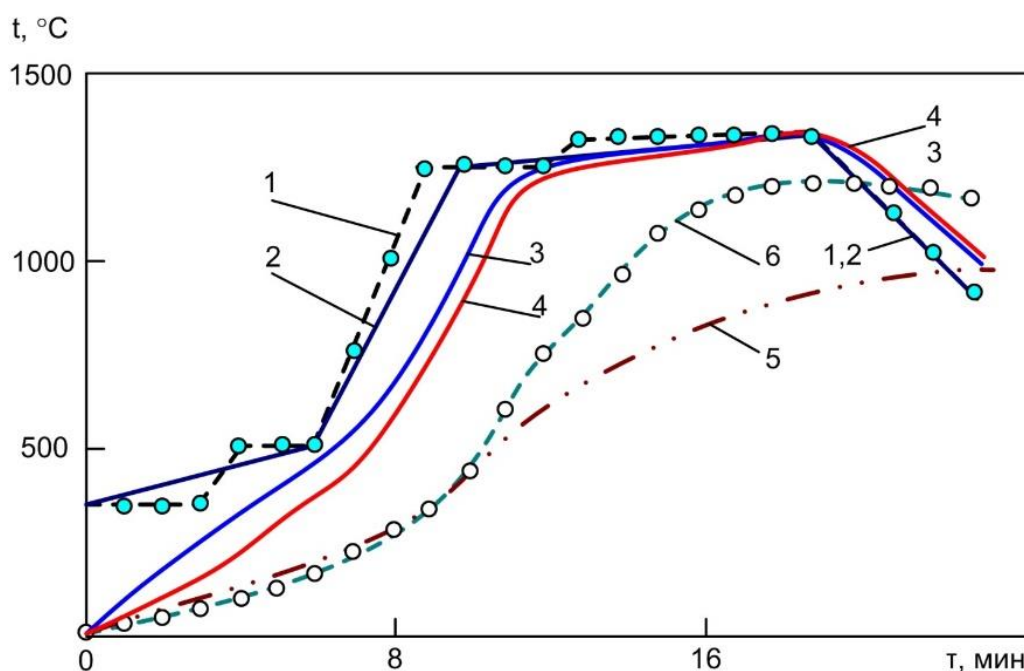


Рис. 2. Изменение температур газа и окатышей при обжиге в аглочаше:

2 – 5 – по расчету; 3, 4 – по формуле (6); 5 – по формуле (7);
6 – из эксперимента; 1,2 – температура газа на входе в слой; 3 – 6 – температура окатышей; расстояние от поверхности слоя 100 (3,5), 200 (4) и 120 мм (6)

В расчете были приняты следующие, определяющие решения задачи, параметры. Начальная температура сухих окатышей всюду одинакова и равна 20 °С. Скорость движения ленты принята 1 м/мин, а длина зон I – IV вычислена так, чтобы время прохождения окатышами зон соответствовало эксперименту на аглочаше. Теплофизические характеристики окатышей приняты в соответствии с

литературными данными [1]. Теплофизические характеристики газа – теплоносителя приняты по данным работы [10]. Время расчета слоя высотой 0,5 м составляет 6–8 мин.

Заключение. Разработана методика приближенного расчета теплообмена в слое окатышей, в основе которой лежит решение задачи при произвольных граничных условиях. Упрощение задачи достигнуто за счет использования метода линейно-ступенчатой аппроксимации, обладающего более высокой точностью по сравнению с другими методами. Составлена программа расчета теплообмена в слое железорудных окатышей применительно к их обжигу на конвейерной машине, позволяющая учитывать изменение многих параметров процесса. Она реализована на конкретном примере практического расчета теплообмена в слое обжигаемых окатышей.

Список использованных источников

1. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства: книга / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
2. Lowenthal G.C. The specific heat of metals between 1200°K and 2400°K. Austral. J. Phys., 1963. 16. №1. 47 – 67.
3. Rasor N.S., McClelland J.D., Thermal property measurement at very high temperatures Rev. Scient. Instrum., 1960. 31. №. 6. 595.
4. Исследование теплофизических свойств окатышей из концентратов различных месторождений. Сообщение 1 / В.М. Абзалов, А.П. Буткарев, Г.М. Майзель, В.И. Лобанов // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. №6. С. 19-22.
5. Исследование теплофизических свойств окатышей из концентратов различных месторождений. Сообщение 2 / В.М. Абзалов, А.П. Буткарев, Г.М. Майзель, В.И. Лобанов // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. №10. С. 50-53.
6. Теплотехника окускования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский, В.М. Бабошин, Г.М. Майзель. – М.: Металлургия, 1970. – 342 с.
7. Munro W.T., Amundson N.R. Solid-Fluid Heat-Exchange in Moving Bends. – Ind. Eng. Chem., 1950. V. 42. P. 1481.
8. Теплотехнические расчеты агрегатов для окускования железорудных материалов / С.В. Базилевич, В.М. Бабошин, Я.Л. Белоцерковский [и др.]. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
9. Бережной Н.Н. Исследование газопроницаемости и теплообмена в слое железорудных окатышей при обжиге на колосниковой решетке // Сталь. 1965. №2. С. 107-112.
10. Топливо и расчеты его горения / С.Н. Гуцин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – 89 с.